

低域混成波のパラメトリック不安定性への有限幅 ポンプの影響

松本和憲*・高村秀一**・奥田孝美**

*工学部 電気工学科

**名古屋大学工学部電気工学科

（昭和52年9月28日受理）

1. まえがき

低域混成共鳴加熱は研究の初期の段階において、入射高周波の縦波への線形モード変換に基づいて議論された⁽¹⁾。しかし、プラズマに印加される高周波電力が大きくなると、非線形モード変換、即ち、パラメトリック不安定性と総称される種々の不安定波動の誘起が問題となる⁽²⁾。これは、不安定波動によって新たな加熱や異常な拡散が引き起こされたりするからである。最近、大型トーラス装置における大電力の低域混成共鳴加熱が試みられ、プラズマ表面のみの加熱が強く、高周波電力のプラズマ内部への伝達が少い現象が不安定波動の励起との関連において実験及び理論的な観点から指摘された⁽³⁾⁽⁴⁾。そして、高周波電磁界が如何なる機構で、どんな条件の下に、どのような波動を励起するかを詳しく研究することが要請される一方、パラメトリック不安定性を制御することによって有効な内部加熱を達成することが重要となってきた。

パラメトリック不安定性を制御する方法として、レーザ核融合の分野で、入射レーザ光のコヒーレンシーを悪くし、入射レーザ光の周波数スペクトルに不安定性に対する共鳴幅より広い、ある有限の幅を持たせる方法が提案されている^{(5)~(7)}。これは、入射電力のうち不安定性に作用する電力は共鳴幅の中に含まれる電力のみであることに注目し、入射電力の実質的に不安定性を駆動する電力を減少せしめ、その減少の割合に応じてパラメトリック不安定性の閾値や成長率を制御する方法である。

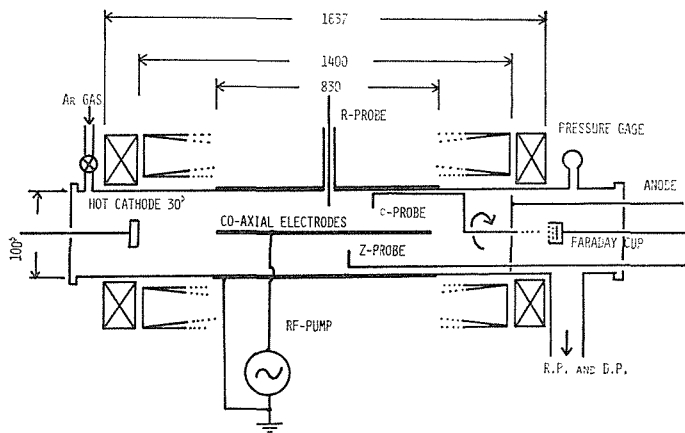
本研究は、低域混成周波数近傍のポンプ高周波の下に励起されるパラメトリック不安定性に対して、上述の制御方法が適用できるかどうかを基礎的な実験で調べるとともに、大電力の低域混成共鳴加熱実験に関連して、その有用性を検討することを目的としている。我々は、研究の第一段階として、後述するように望ましくはないが簡単な方法である、雑音による振幅変調法によって、周波数スペクトルに、ある有限の幅を持つ低域混成周波数近傍のポンプ高周波を作り、このようなポンプ高周波が実際にパラメトリック不安定性やプラズマに対して、どのような影響を与えるかを実験で調べた。その結果、実験で用いたポンプ高周波はその周波数スペクトルの拡がりが充分ではなかったために、パラメトリック不安定性の閾値はほとんど変化しなかったが、理論的には予期されなかった次のような現象が見出された。即ち、閾値以上におけるパラメトリック不安定性の定常状態

の振幅の減少，低周波並びに高周波領域における雑音スペクトルの増大，及び，イオンの著しい加熱が観測された。

以下，第2章では実験装置及び測定方法を述べ，第3章では三節に分けて実験結果を述べる。第1節ではコヒーレントポンプ高周波の場合，第2節では非コヒーレントポンプ高周波の場合，第3節ではプラズマ温度について述べる。最後の章では本実験で得られた主要な結果を要約する。

2. 実験装置及び測定方法

実験装置の概略を第1図に示す。磁場コイルは中央の16個の空心コイルと両端に2個ずつの4個の空心コイルより成り，磁場分布ができるだけ一様になるように配置された。プラズマは直径3cmの酸化物熱陰極を用いたアルゴンガス中の直流放電によって生成され，プラズマの長さは約140cmである。放電管は内径9.5cm，長さ180cmの耐熱ガラス管を使用した。ポンプ高周波は整合回路及び方向性結合器を通してプラズマに結合され，放電管中心軸に取り付けられた直径5mm，長さ83cmの電極棒と放電管外側に巻かれたほぼ同じ長さの円筒電極との間に同軸状に印加された。

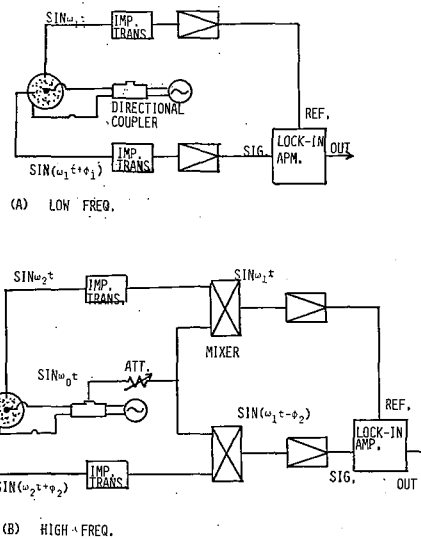


第1図 実験装置概略

Fig. 1 Experimental setup.

典型的な実験条件は，ガス圧 $2 \times 10^{-4} \text{ Torr}$ 放電電流 100 mA ，磁場 $B_z = 1.1 \text{ KG}$ である。電子密度は空間分布のピーク値で $N_e = 1 \sim 3 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 電子温度は $T_e = 5 \sim 8 \text{ eV}$ ，イオン温度は $T_i = 1.0 \sim 1.5 \text{ eV}$ である。電子-アルゴン中性原子衝突の平均自由行程は約 1 m ，イオンのラーモア半径は $\rho_i \approx 1.0 \text{ cm}$ である。又，ポンプ高周波の中心周波数は 1.3 MHz である。

電子密度及び電子温度は，放電管中央に取り付けられた動径方向に可動なラングミュアー探針により測定された。イオン温度は，陽極から磁力線に沿って挿入されたファラデーカップにより測定された。プラズマ中の励起波の周波数スペクトルは，ラングミュアー探

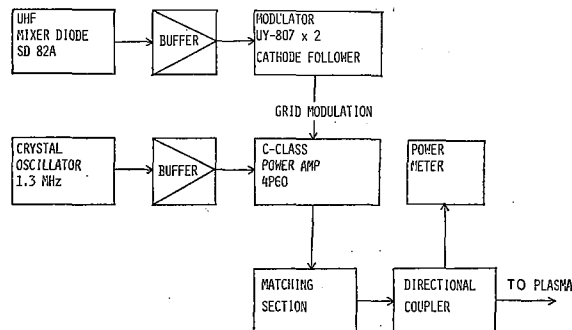


第2図 位相測定回路 (a)・低周波側 (b) 高周波側

Fig. 2 Phase measurement circuits. (a) Low frequency side. (b) High frequency side.

針を浮遊電位に保ち周波数分析器を用いて測定され、位相測定は、第2図に示す回路でロックイン増幅器を用いて測定された。吸収電力は方向性結合器の入射電力と反射電力との差から評価され、同軸状の電極間に印加されるポンプ高周波の電圧は、真空管式電圧計で測定された。ここで、この電圧計はピーク値を実効値で目盛っているため、入力波形が正弦波の場合は実効値を指示するが、振幅が雑音などで変調されている場合には時間平均的なピーク値を $\sqrt{2}$ で除した値を指示する。本実験では変調度 M を入射パワーが一定の条件の下に、真空管電圧計の指示が無変調時 $V_p / \sqrt{2}$ 、雑音で変調時 $V'_p / \sqrt{2}$ の時、 $M \approx (V'_p - V_p) / V_p \times 100 (\%)$ より近似的に定めた。

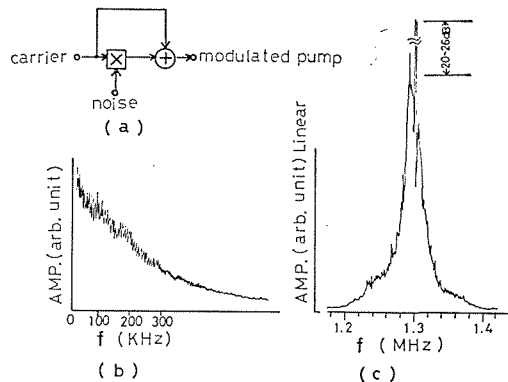
ポンプ高周波系のブロック図を第3図に示す。UHF ミクサーダイオードから発生する



第3図 ポンプ高周波系のブロック図

Fig. 3 Block diagram of r.f. pump system.

雑音で、周波数が 1.3 MHz 程度の搬送波を振幅変調することによりポンプ高周波の周波数スペクトルは広げられる。この変調方式のモデルは第4図 (a) のように表らわれ、平衡変調方式と違って、搬送波成分が残っているのが特徴である。同図 (b), (c) に、雑音源の周波数スペクトル及び被変調ポンプ高周波の典型的な周波数スペクトルをそれぞれ示す。この方式は、簡単にポンプ高周波の周波数スペクトルに拡がりを作ることができる長所はあるが、ガウス分布の場合のように、特徴的な周波数スペクトル幅というもの定義しにくい短所がある。本実験では、変調度 M をポンプ高周波の周波数スペクトルの拡がり特徴づけるパラメータとして用いた。それは、変調度を変えると、ポンプ高周波成分の中で、搬送波成分と、それ以外の拡がりの成分の大きさの比が変わり、ポンプ高周波における周波数スペクトルの拡がりの効果が変わるからである。変調度は、第3図で、変調段のグリッドバイアスを変えることによって調整される。



第4図 (a) 振幅変調のモデル図 (b) 雑音源の周波数スペクトル
(c) 雑音で振幅変調されたポンプ高周波の典型的な周波数スペクトル

Fig. 4 (a) Model of amplitude modulation. (b) Frequency spectrum of the noise source. (c) Typical frequency spectrum of the amplitude modulated pump with the noise source.

3. 実験結果

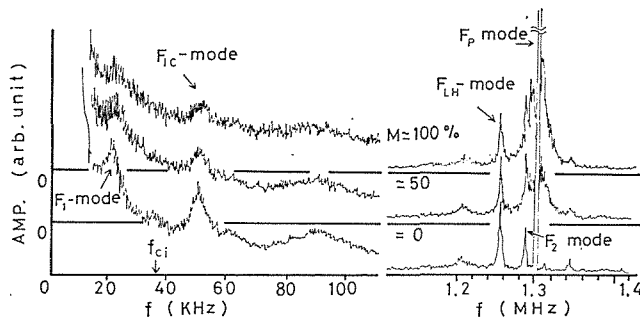
3.1 コヒーレントポンプ

初めに、低域混成共鳴周波数近傍の単一周波数から成るコヒーレントなポンプ高周波をプラズマに印加した時、パラメトリック不安定性の励起について述べる⁽⁸⁾。

プラズマ中には、周波数がイオンサイクロトロン周波数より低い低周波の自然励起波 F_1 モードが既に存在している。これは、プラズマを生成し直流放電を維持するための軸方向の電子流によって励起されるイオン音波である。ポンプ高周波を印加すると、先ず、ポンプ高周波 F_p モードの低域側波帯に、 F_1 モードと F_p モードとの間に周波数整合条件を満たした高周波 F_2 モードが励起される。これは、低周波の F_1 モードと高周波の F_p モードとの間に周波数整合条件を満たした高周波 F_2 モードが励起される。これは、低周波の F_1 モードと高周波の F_p モードとの間に周波数整合条件を満たした高周波 F_2 モードが励起される。

ードとの間の非線形な混合によって励起される電子プラズマ波である。

次に、ある閾電圧値から、周波数がイオンサイクロトロン周波数よりやや大きい低周波 F_{IC} モード、及び、ポンプ高周波の低域側波帯に高周波 F_{LH} モードが励起される。ここで、これらのモードとポンプモードの間には、周波数保存則、並びに、方位角方向及び軸方向の波数保存則が満たされている。 F_{IC} モード及び F_{LH} モードは、それぞれ、共鳴崩壊モードの静電イオンサイクロトロン波及び *Trivelpiece-Gould* モード（電子プラズマ波）である。閾電圧値以上では、更に、 F_{IC} モードの2倍の高調波及びポンプ高周波の高域側波帯に高周波モード（反ストークス線）が励起される。後者は低周波 F_{IC} モードとポンプ高周波モードとの間の高次モードである。第5図、変調度 $M=0$ の周波数スペクトルに、コヒーレントなポンプ高周波の下に励起された典型的なパラメトリック崩壊スペクトルを示す。



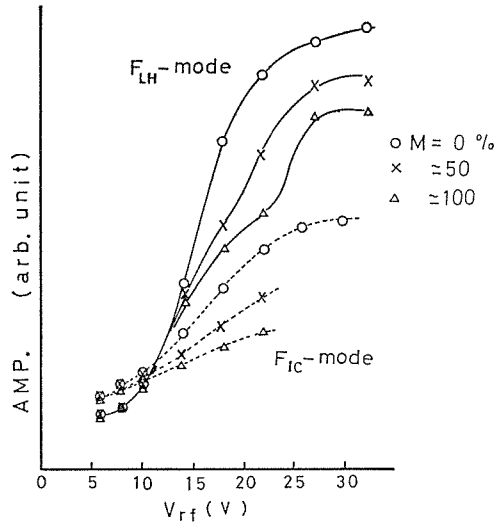
第5図 周波数スペクトルに有限の広がりをもつポンプ高周波印加時の典型的なパラメトリック崩壊スペクトル

Fig. 5 Typical frequency spectra of the parametric instabilities at the finite-bandwidth pump.

3.2 非コヒーレントポンプ

雑音で振幅変調された低域混成共鳴周波数近傍の非コヒーレントなポンプ高周波をプラズマに印加した実験において、前章の実験結果のもとに、周波数スペクトルにある有限の広がりを持つポンプ高周波がパラメトリック不安定性やプラズマに与える効果について述べる。

第5図に、変調度 M をパラメータとして、周波数スペクトルに、ある有限の広がりを持つポンプ高周波がパラメトリック崩壊スペクトルに与える典型的な影響を示す。ここで、全ての M に対して、入射パワーは同じで一定に保たれている。第5図より、変調度が上がり、ポンプ高周波における周波数スペクトルの広がり効果が大きくなるにつれて、パラメトリック崩壊モードである F_{IC} モード及び F_{LH} モードのスペクトルの振幅が減少することが分る。自然励起波 F_1 モードも同様の変化を辿る。同時に、低周波及び高周波領域における雑音スペクトルが次第に増大する。これらの現象は、ポンプ高周波の印加電圧を高くするにつれて一層著しくなり、ついには F_1 モード及び F_{IC} モードは低周波側の雑音



第6図 印加高周波電圧に対する崩壊モードの振幅変化

Fig. 6 Variation of the amplitudes for parametric decay modes with. r. f. pump voltage.

スペクトルの中に埋もれてしまう。第6図に、変調度 M をパラメータとして、印加高周波電圧（実効値）に対するパラメトリック崩壊モードのスペクトルの振幅の変化を示す。ここで、 F_{IC} モードのデータが、 $V_{rf} \geq 25V$ で、 $M \approx 50\%$ 、 100% の時、書き込まれていないのは、 F_{IC} モードがもはや低周波側の雑音スペクトルの中に埋もれてしまって判別できないからである。第6図より、パラメトリック崩壊モードの F_{IC} モードあるいは F_{LH} モードの閾値は、 M 、即ち、ポンプ高周波における周波数スペクトルの拡がりの効果の如何にかかわらず、ほとんど変化しないが、閾値以上の高周波電圧では、パラメトリック崩壊モードの定常状態におけるスペクトルの振幅が M の増加につれて減少することが分る。

最初に、閾値がほとんど変化しなかったことについて考える。理論^{(5)~(7)}によれば、周波数スペクトルに、ある有限の幅を持つポンプ入力におけるパラメトリック不安定性の閾値は、単一周波数から成るポンプ入力の場合より、全入力電力 P_0 と注目する不安定モードの共鳴幅 γ （成長率）内に含まれる入力電力 P_γ との比、即ち、 P_0/P_γ の分だけ上昇することが示される。ここで、本実験におけるこの比を評価する。低周波 F_{IC} モードを静電イオンサイクロトロン波とした時のパラメトリック不安定性に対する γ は、

$$\gamma \approx \frac{U}{4C_s} \cdot \frac{\omega_{LH}}{\omega_p} \left[2\omega_1\omega_2 \left(\frac{T_e}{T_i} \right) I_1(b_i) \exp(-b_i) \right]^{1/2}$$

$$\text{但し, } U \equiv CE_{rf}/B_z, \quad b_i \equiv (k_1 \rho_i)^2$$

と表わされる。ここで、 I_1 は第一種変形ベッセル関数である。本実験条件の下では、 $U/C_s \approx 2$ 、 $\omega_{LH}/\omega_p \approx 0.25$ 、 $T_e/T_i \approx 4$ 、 $b_i \approx 1.5$ 、 $\omega_1/2\pi \approx 50\text{KHz}$ ($B_z = 1.1\text{KG}$)、

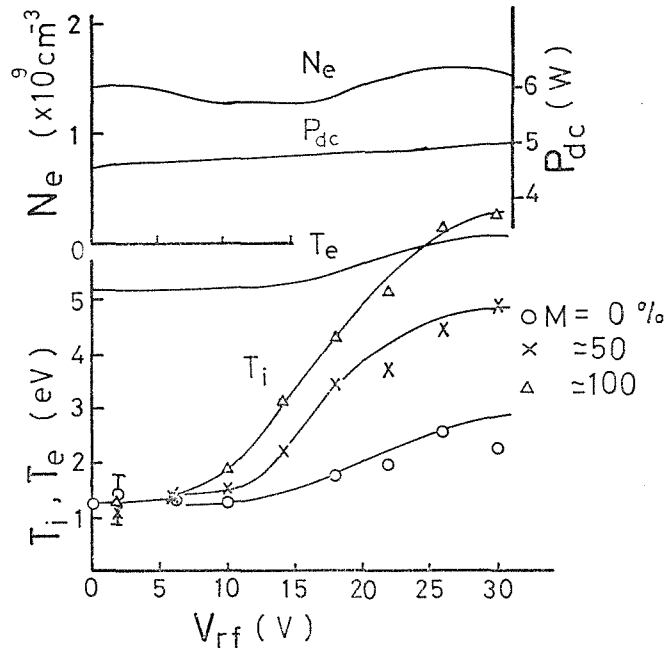
$\omega_2/2\pi \simeq 1.25\text{MHz}$ であるので、 $\gamma/2\pi \simeq 45\text{kHz}$ となる。この周波数幅は、第4図(c)におけるポンプ入力に対して、搬送波成分を除いた拡がりの成分の全半値幅よりやや大きい程度である。ここで、本実験のようにポンプ入力の周波数スペクトルの拡がりの中に搬送波成分が大きく残っている場合には、ポンプ入力のうち共鳴幅に含まれる電力 P_γ を評価するためには、変調度に対する、全ポンプ入力 P_0 における搬送波成分の電力 P_c の占める割合、即ち、 P_c/P_0 を評価しておく必要がある。一般に変調度を m ($=M/100$) とした時、 $P_c/P_0 = 2/(2+m^2)$ と表わされるので、本実験において、変調度 $M \simeq 50\%$ 及び 100% の時、 P_c/P_0 は、それぞれ、凡そ 0.88 及び 0.66 程度となり、全ポンプ入力に対して搬送波成分を除いた拡がりの成分の占める割合が非常に小さいことが分る。従って、以上のことから、本実験では、凡そ、 $P_0/P_\gamma \simeq 1$ であると評価される。このことは、本実験において、変調度の変化、即ち、ポンプ入力における周波数スペクトルの拡がりの効果の変化に対して、パラメトリック不安定性の閾値がほとんど変化しなかったという実験結果に一致するが、本実験で用いたポンプ入力の周波数スペクトルの拡がり（振幅変調方式では拡がりの成分に比べ搬送波成分が大きく残り、拡がりの効果が軽減されることをも加えて）、パラメトリック不安定の閾値を変化させるには不十分であったことをも示している。

次に、閾値以上での、変調度の増加にともなう、パラメトリック崩壊モードの定常状態における、スペクトルの振幅の減少、即ち、飽和レベルの減少について考える。これは、パラメトリック不安定性の飽和レベルについての理論研究がほとんど行なわれていないこともあって、考察しにくい現象である。我々は目下、この現象には、低周波及び高周波領域における雑音スペクトルの増大、即ち、プラズマの乱流化が関係していると考えている。つまり、パラメトリック崩壊モードが乱流場によって散乱され、崩壊モードの飽和レベルを決める損失が大きくなるからだと考えてるのである。ここで、飽和レベルは、注目するモードに対する入力と損失の釣り合いで決定され、入力が一定ならば、損失の増加とともに飽和レベルは減少すると考えている。一方、この現象は、実用面から見ると、ポンプ高周波の周波数スペクトルの拡がりを、注目するパラメトリック崩壊モードの共鳴幅に比べそれほど広くしなくとも、パラメトリック不安定性を制御できる可能性を示唆しており有用であると考えられる。

3.3 プラズマ温度

第7図に、変調度 M をパラメータとして、ポンプ高周波電圧に対するイオン温度 T_i 及び電子温度 T_e の温度変化を、電子密度 N_e 並びにプラズマを生成するための直流入力 P_{dc} とともに示す。ここで、 T_e 、 T_{dc} 及び N_e は、パラメータ M に対して、ほとんど変化しない。又、軸方向の直流放電電流は常に一定に保っている。イオン温度は磁場と平方向の測定温度であるが、本実験では約 5cm プラズマ半径に対してイオンのラーモア半径が凡そ 1cm 程度であるので、磁場と垂直方向のイオン温度も、ほぼこの温度と等しいと考えられる。

第7図より、変調度 M の増加に伴ってイオン温度のみが著しく上昇することが分る。このイオンの加熱は、電子温度或は直流入力ほとんど変化していないことから、電子温



第7図 印加高周波電圧に対するプラズマ温度，電子密度，直流入力の変化

Fig. 7 Variation of the plasma temperature, electron density and d. c. input power with r. f. pump voltage.

度の上昇に伴う電子—イオン衝突による加熱，あるいは，直流入力の増加に伴う直流電場による加熱ではない。ここで，変調度の増加に伴って変化し，イオン温度に関係するようなプラズマ内の現象を考えてみると，低周波及び高周波領域における雑音スペクトルの増大，即ち，プラズマの乱流化が挙げられる。本実験では，低周波及び高周波領域の雑音スペクトルの周波数は，それぞれ，イオンラーモア周波数及びイオンプラズマ周波数程度（広い周波数幅はあるが，）であり，このような周波数に対してはイオンは充分追随できる。我々は，このイオンの加熱機構に対して，イオンが直接影響を受け易い周波数帯の雑音スペクトルの増大によって，イオンがランダムな電場から加速，散乱され，乱流加熱（統計加熱）される機構を考えている。ここで，周波数スペクトルに，ある有限の拡がりを持つポンプ高周波電界によってイオンが著しく加熱されたという実験結果は，イオンの加熱とこのようなポンプ高周波によって引き起こされるプラズマの乱流化が関係しているとすれば，従来の高周波加熱方式に積極的に乱流加熱方式を取り入れた混成タイプの加熱方式が，新しい加熱方式として有効である可能性を示唆している。

4. まとめ

雑音によって振幅変調を施され，周波数スペクトルにある有限の拡がりを持つ低域混成共鳴周波数近傍のポンプ高周波が，パラメトリック不安定性やプラズマに与える影響を実

験的に研究した。ポンプ高周波の周波数スペクトルの拡がり充分ではなかったために、パラメトリック不安定性の閾値はほとんど変化しなかったが、理論的には予期されなかった現象として、閾値以上におけるパラメトリック崩壊モードの飽和レベルの減少、低周波及び高周波領域の雑音スペクトルの増大、及び、イオンの著しい加熱が観測された。これらの現象に対しては、雑音スペクトルの増大に伴うプラズマの乱流化が関係していると考えられる。

搬送波成分を除いた周波数のスペクトルに、ある有限の幅を持つポンプ高周波の実験については、改めて報告する。

最後に、有益な議論をして頂きました日本原子力研究所田中裕二博士、実験装置の製作に御助力いただきました名古屋大学工学部森光雄氏に感謝申し上げます。

文 献

- (1) A.D. Piliya and V.I. Fedorov : Sov. Phys. JETP **30**, 653 (1970)
- (2) 高村, 相原, 奥田 : 日本物理学会誌, **29**, 324 (1974)
- (3) S. Takamura and P. Javel : Report of Department of the Plasma Physics and the Fusion Control, Grenoble, EUR-CEA-FC-863 (1976)
- (4) I. Fidone and G. Granate : Phys. of Fluids, **19**, 293 (1976)
- (5) E. Valeo and C. Oberman : Phys. Rev. Letters, **30** 1035 (1973)
- (6) J. J. Thomson : Nucler Fusion, **15**, 237 (1975)
- (7) D. Anderson and H. Wilhelmsson : Physica Scripta, **11**, 341 (1975)
- (8) 松本, 高村, 奥田 : 電気学会投稿中, 或は松本, 高村, 奥田 : 核融合研究, **34**, 590 (1975)
- (9) M. Porkolab : Proc. of the Symposium on Plasma Heating in Toroidal Devices, Varenna, Italy, P. 41 (1974)

Effects of Finite-Bandwidth Pump on the Parametric Instabilities near the Lower-Hybrid Frequency

Kazunori MATSUMOTO*, Shuichi TAKAMURA**
and Takayoshi OKUDA**

*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering

**Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya
University

The effects of a finite-bandwidth pump on the parametric instabilities near the lower-hybrid frequency are investigated experimentally. The experiment was performed in a linear plasma device of argon d.c. discharge. R.f. pump whose frequency bandwidth was broadened by amplitude modulation with a noise source was coupled with plasma through coaxial electrodes. The threshold of the parametric instabilities showed only very small change because of insufficient frequency broadening. Nevertheless, above the threshold diminution of the spectrum peaks of decay waves was observed. Furthermore, the ion heating was remarkably enhanced as the plasma became turbulent.